

В.И. ВИННИЧЕНКО, докт. техн. наук, проф., **Д.В. ЛИСИН**, аспирант,
Н.Н. МОКРЕНКО, аспирант, **В.В. КУЗЕМСКИЙ**, студент,
Ю.А. БОНДАРЕНКО, студент, ХНУСА, Харьков

ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ТВЕРДОЙ ВЗВЕСИ ФОСФОГИПСА В ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Виконано теоретичний аналіз процесу дегідратації дигідрату сульфату кальцію при термічній обробці частинок фосфогіпсу у завислому стані в потоці теплоносія. Отримано нову математичну залежність для визначення гідравлічного діаметру дегідратору.

Выполнен теоретический анализ процесса дегидратации дигидрата сульфата кальция при термической обработке частиц фосфогипса во взвешенном состоянии в потоке теплоносителя. Получена новая математическая зависимость для определения гидравлического диаметра дегидратору.

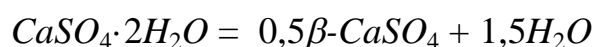
Theoretical analysis of the dehydration of calcium sulfate dihydrate in the thermal processing of particles in a suspension of phosphogypsum in the flow of coolant. A new mathematical relationship to determine the hydraulic diameter of the dehydrator.

Среди многотоннажных отходов промышленности значительный интерес представляет фосфогипс с точки зрения использования его в качестве сырья в производстве строительных материалов и изделий. Это позволит приостановить дальнейшее загрязнение почвы, водного и воздушного бассейнов в районах накопления, даст возможность начать процесс освобождения земли из под отвалов, а также снизить или даже остановить дальнейшую разработку и освоение карьеров по добыче природного гипсового сырья.

Вопросам утилизации фосфогипса уделяется значительное внимание во всех развитых странах мира. Проведены многочисленные исследования и предложены конкретные меры по утилизации фосфогипсовых отходов. Но несмотря на это фосфогипс продолжают сбрасывать в отвалы.

В настоящее время проводятся научные исследования, посвященные опробованию нового способа переработки фосфогипса в строительные материалы. Суть способа в том, что дигидрат сульфата кальция из которого состоит фосфогипс, превращается в полугидрат сульфата кальция во время пневмотранспортирования его твердой взвеси в потоке теплоносителя. Для осуществления этого превращения создан дегидратор, в котором обжиг фос-

фогипса осуществляется за несколько секунд. Частицы фосфогипса одновременно пневмотранспортируются, нагреваются и после нагрева протекает химическая реакция



Процессы, осуществляемые в короткий промежуток времени, очень сложны и теоретически проработаны недостаточно. Методики расчета параметров машины не существует и в данной статье предлагается попытка их теоретического обоснования. При протекании эндотермической реакции в частицах материала с выделением газообразного компонента во время пневмотранспортирования твердой взвеси частиц материала изменяется характеристика теплоносителя и материала. Изменяются не только плотность, температура и кинематическая вязкость, но и количество теплоносителя, проходящего через поперечное сечение газохода, поскольку газообразный продукт химической реакции становится компонентом теплоносителя.

Чтобы определить основные параметры установки для термической обработки, необходимо найти скорость витания частиц материала относительно газового потока и скорость газового потока. Причем, продолжительность пребывания частиц в установке должна быть максимально приближена к скорости протекания реакции и незначительно превышать ее. Скорость витания частиц дигидрата сульфата кальция в момент встречи с газовым потоком определяем по рекомендациям [1] с учётом критериальных зависимостей Архимеда (Ar) и Лященко (Ly)

$$Ar = \frac{d^3 \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_g)}{v^2 \cdot \rho_g}$$

где d – максимальный диаметр частиц материала, м; ρ_m, ρ_g – соответственно, плотность материала и газа, кг/м³; v – кинематическая вязкость газа, м²/с.

Скорость витания, т.е. скорость частиц материала относительно теплоносителя

$$\omega_g = \sqrt[3]{\frac{L_y \cdot v \cdot \rho_m \cdot g}{\rho_g}}$$

Анализ материальных потоков выполняем на 1 кг конечного продукта – полугидрата сульфата кальция. Теоретическое потребление сухого сырья [2], кг/кг полугидрата

$$G_c^T = \frac{100}{100 - ППП^c}$$

где $ППП^c$ – потери при прокаливании сырья, % от массы сырья.

Практическое потребление сырья с учетом уноса пыли и остаточной влажности после сушилки, кг/кг полугидрата

$$G_c = \frac{G_c^T \cdot 100}{100 - a_{yn}} \cdot \frac{100}{100 - w_c}$$

где a_{yn} – общий унос пыли, % от массы сырья, w_c – влажность сырья, поступающего из сушилки, %.

При образовании 1 кг полугидрата выделяется паров влаги [2]

- гидратной

$$G_w^z = \frac{G_c^T \cdot M_{1,5H_2O} \cdot (CaSO_4 \cdot 2H_2O)}{M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \cdot 100}$$

где M_{H_2O} , $M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}$ – молекулярная масса, соответственно, выделившейся из кристаллов дигидрата сульфата кальция, воды и самого дигидрата сульфата кальция, кг, $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ – содержание дигидрата сульфата кальция в сырье, % – физической влаги сырья

- в массовых единицах

$$G_w^\phi = \frac{G_c \cdot W_c}{100 - W_c} = \frac{1.2 \cdot 1}{100 - 1} = 0,01$$

- в объёмных единицах

$$V_w^\phi = \frac{G_w^\phi}{\rho_{в.н}}$$

Общее количество тепла, которое теплоноситель должен передать материалу, определяется из формулы

$$Q_m = \alpha \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau$$

где Δt – разности температур теплоносителя и материала на входе и выходе из агрегата.

Количество тепла, получаемое материалом, расходуется на нагрев материала, испарение остаточной влаги и дегидратацию. Исходя из этого, примем следующие допущения:

- подсистемы (теплоноситель – твердое тело) могут обмениваться массой в результате химической реакции, а система в целом является закрытой;
- для упрощения рассуждений пренебрегаем потерями в окружающую среду;
- принимаем, что сумма массы материала и теплоносителя в начале тепловой обработки и в конце ее – величина постоянная;
- температура материала и температура теплоносителя на выходе из установки равны между собой.

Количество тепла передаваемое теплоносителем материалу складывается из:

- тепла, необходимого на нагрев материала и влаги в нем

$$Q_1 = m \cdot c(t - t_1) + m_w \cdot c_w(t_2 - t_1);$$

- тепла, расходуемого на испарение влаги

$$Q_2 = m_w \cdot r;$$

- теплового эффекта химической реакции дегидратации

$$Q_3 = m \cdot Q_t \cdot \beta;$$

Тогда уравнение теплового баланса принимает вид

$$\alpha F \Delta t \tau = Q$$

или

$$\alpha F \Delta t \tau = m \cdot c (t - t_1) + m_w c_w (t_2 - t_1) + m_w r + m Q_t \beta$$

где m – масса материала, кг; α – коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к материалу, Вт/м² гр; F – тепловоспринимающая поверхность материала, м²/кг; Δt – разность температур между материалом и теплоносителем; τ – время, с; c – теплоемкость материала, Дж / кг гр; t, t_1 – соответственно температура материала на выходе из установки и на входе в установку; t_2 – температура испарения влаги; m_g – масса теплоносителя, кг; c_g – теплоемкость теплоносителя, Дж/ кг гр; m_w – масса влаги в материале, кг; r – удельная теплота парообразования, Дж / кг; Q_t – тепловой эффект реакции при температуре протекания реакции, Дж/кг; β – степень завершенности химической реакции.

Продолжительность обжига во взвешенном состоянии

$$\tau = \frac{Q}{F \cdot \alpha \cdot \Delta t},$$

где F – тепловоспринимающая поверхность материала, м²/с; α – коэффициент теплоотдачи между теплоносителем и материалом; Δt – среднелогарифмическая разность температур.

Тепловоспринимающая поверхность материала, м²/с

$$F = \frac{6 \cdot G}{d \cdot \rho_M};$$

где ρ_M – плотность материала, кг/м³, Δt – среднелогарифмическая разность температур между теплоносителем и материалом, °С [1];

$$\Delta t = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{2,3 \lg \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}},$$

где Δt_B – наибольшая разность температур между газовым потоком и материалом, °С; Δt_M – наименьшая разность температур между газовым потоком и материалом, °С.

Наибольшая разность температур при прямотоке

$$\Delta t_B = t_n^{\Gamma} - t_n^M,$$

где $t_n^{\Gamma}; t_n^M$ – соответственно начальная температура газа и материала, °С.

Наименьшая разность температур при прямотоке

$$\Delta t_M = t_K^{\Gamma} - t_K^M.$$

где $t_K^{\Gamma}; t_K^M$ – соответственно конечная температура газа и материала.

Теоретическое определение коэффициента теплоотдачи осуществляем по [1]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d},$$

где λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/м·гр; d – диаметр частицы материала, м; Nu – критерий Нуссельта.

Внутренний гидравлический диаметр дегидратора в начале термообработки

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi\omega}},$$

где V – секундный расход теплоносителя, м³/с; ω – действительная скорость движения газов, м/с.

Действительная скорость движения газов определяется по скорости витания наиболее крупных частиц материала. При этом, по мнению П.В. Левченко [3] она должна на (20 – 30) % превышать скорость витания, чтобы не создавать лишние аэродинамические сопротивления и не способствовать увеличению расхода энергии. Соколов [1] считает, что действительная скорость движения газов должна быть больше скорости витания взвешенных частиц в 1,5 – 2 раза.

Секундный расход теплоносителя на входе в обжиговую установку представляет собой произведение определённого заранее (из теплового баланса) удельного расхода теплоносителя на производительность обжиговой установки

$$V = V_z \cdot P \cdot \frac{273+t}{273}$$

где P – производительность обжиговой установки по конечному продукту, кг/с.

На выходе из обжиговой установки к удельному объёму теплоносителя добавляется влага, выделившаяся при дегидратации

$$V = \left[V_z \left(1 + \frac{t}{273} \right) + v_{H_2O}^m \right] P$$

где V_z – количество теплоносителя, определяемое из уравнения теплового баланса.

Количество водяных паров, выделившихся при дегидратации дигидрата сульфата кальция до полуводного гипса

$$v_{H_2O}^m = \frac{G_c \cdot M_{1,5H_2O} \cdot (CaSO_4 \cdot 2H_2O)}{M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O \cdot \rho_{6,n}} \cdot 100}$$

Гидравлический диаметр дегидратора на выходе из обжиговой установки, м

$$D = \sqrt{\frac{1,27 \cdot P \cdot \left(V_z \frac{273+t}{273} + \frac{G_c \cdot M_{1,5H_2O} \cdot (CaSO_4 \cdot 2H_2O)}{M_{CaSO_4 \cdot 2H_2O \cdot \rho_{6,n}} \cdot 100} \right)}{\omega_z}}$$

Широко известна формула определения длины пути прохождения частичками материала, который транспортируется газовым потоком

$$l = (\omega_r - \omega_b) \tau$$

Экспериментальные исследования траектории движения частиц фосфогипса при транспортировании их теплоносителем внутри вертикальной шахты – часть трубы сделана из кварцевого стекла – показали, что частицы материала движутся не прямолинейно, а по спирали.

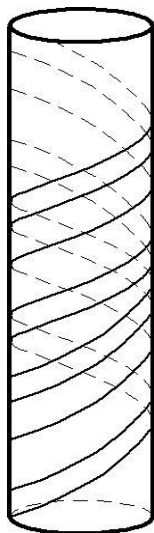


Рис. Путь движения частиц фосфогипса при транспортировании их теплоносителем.

Очевидно, что высота дегидрататора должна быть меньше пути движения частиц в случае, если при определении времени движения частиц учтен период, необходимый для завершения всех тепловых процессов, в том числе и химических реакций.

Тогда формула высоты дегидрататора принимает вид

$$H = k \cdot l,$$

где k – коэффициент, учитывающий непрямолинейность движения частиц материала и продолжения теплообмена в циклонах и соединительных трубах.

В настоящее время величина этого коэффициента уточняется.

Выводы.

Предложена математическая модель взаимосвязи между гидравлическим диаметром дегидрататора и основными параметрами теплоносителя и твердой взвеси в нем, которая позволяет при определении гидравлического диаметра учитывать не только характеристику теплоносителя, но и основные параметры частиц материала, взвешенных в газовом потоке.

Список литературы: 1. Соколов В.Н. Машины и аппараты химических производств / В.Н. Соколов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 306 с. 2. Воробьев Х.С. Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов / Х.С. Воробьев, Д.Я. Мазуров. – М.: Высшая школа, 1982. – 547 с. 3. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности / П.В. Левченко. – М.: Высшая школа, 1968. – 368 с.